中華農業研究（Jour. Agric. Res. China）41(2)：216～224（1992）

農用日照計之性能試驗與評估[1]

陳　加　忠[2]

摘要：此研究之目的在於開發測試適用本省農業環境之日照計，並比較其各項性能。實驗結果顯示利用光二極體爲感測元件的日照計其性能可合乎世界氣象組織之一級標準。利用 Cds 原理開發之感測器其誤差值偏高，其性能受到使用時期老化之影響。利用國產照度計改良而成之日照計其量測準確度約爲20W/m²，持久性能十分穩定且成本低廉，此設備可適用於本省設施日照能量量測與控制作業。

關鍵詞：日照計，校正曲線，性能評估

感測系統包含感測元件，信號處理與校正調整，此爲自動控制之必需設備。由於農業環境多爲高溫高濕或強酸強鹼，使用時多受塵土影響，因此工業界所用之感測系統通常不能完全適用於農業。而使用成本之限制，更使昂貴精密的設備無法爲農業業者接受。爲促進農業自動化之落實應用與本土化技術之開發，農用感測器實有自行開發試驗之必要。國內此方面之研究開發方始於起步階段，目前已發表之報告僅有濕度計感測計術與穀物水份計性能評估。[1,2]

本省由於地處熱帶與亞熱帶，終年陽光充沛，因此對設施栽培作業往往造成多餘之熱累積問題，適當的遮蔭作業成爲設施工程設計的重點。

國內溫室業者對於內、外遮蔭網的施設技術已十分純熟，且已利用馬達動力進行機械化作業，但因缺乏適用日照能量感測設備，使遮蔭作業無法達到自動化之要求，研究單位所使用之日照計其單位售價均在數萬元以上，此成本無法爲栽培業者所負擔。

此研究之目的在於開發和試驗適用之日照計，對於性能進行測試比較，以期能得到適用於本省環境之日照能量測設備。

日照能量感測原理

日照能量常用的感測元件與其作用原理介紹如下：

一、光電池（光二極體，Photodiode Photovoltaic Cell）

此種元件主要構造是 n 極塗料的單晶矽基板（N-doped monocrystalline），其表面有一薄層P基極材料，因此產生一p-n 極基板。在光線照射時，由於光電效應引起電子流動而產生一電場，對接點（Terminais）形成一電壓場，而以電流形式輸出。利用此微弱電流訊號（μA）的處理可以用以感測日射能量，由於此種元件檢出範圍受到反應光譜波長之限制（0.4－1.1μm），並不適用人工光源、植株葉冠間或反射光源的量測。但可適用於地表太陽能量的量測。

二、熱電對列元件（Thermopile）

---

1. 臺灣省業試驗所　研究報告第 1623 號。
2. 臺灣省農業試驗所農工系副研究員　臺灣省　臺中縣。

此量測元件主要利用特製之熱電偶（antimony/bismuth），以串聯方式置於陶塑薄膜材料之下。感測部份為黑色以增加能量吸收率，冷接部份則位於內部或白色材料之下。元件接受陽光照射時，因能量吸收引起的溫度差對接點產生一定比例的微弱電壓（μV）。由電壓訊號之處理可用以量測日照能量。此型吸收表面上安置半球形（dome）之覆蓋玻璃，其透過波長為0.285μm至2.8μm，因此可用以量測反射太陽能和葉冠間日照能。

三、光導電電池

此種光導電材料通常為硫化鎘（Cds）或硒化鎘（CdSe），其表面受光照射時產生光導電效應，其特徵為電阻與入射光線成曲線變化。

商品化之日照計以光二極體型與熱電對列元件為主，前者之售價較後者便宜。世界氣象學會（WMO）[10] 將日照計區分為三級：二次標準（Secondary Standards），第一級（First class）與第二級（Second class）。利用光二極體所開發之日照計（Pyranometers）因受波長應用之限制，其等級原在 Second class 之下。近年來，因感測元件的改良，一些特定之此型感測元件其準確性已達到第一級標準。

WMO 對日照量測準確性之定義如下：對二次標準級之單位小時最大誤差為３％，每日最大誤差為２％，對第一級而言，各為８％與５％。在所有商品化之日照計，僅有兩型合乎其 Secondary Standards 性能要求：(1) the Eppley Model PSP 型。(2) the kipp and Zonen Model CM11 型[10]。

典型的商用日照計校正方式如下[6]：如 LI-200SB型日照計（Pyranometey）以 Eppley Precision Spectrat Pyranometer（PSP）為校正標準，以太陽光為自然光源，每10分鐘記錄一次，共執行3～4天，再以兩種日照計之讀出值進行技正比較。

對感測元件性能之影響來自各類誤差，因此對誤差之來源需要加以探討，日照計之誤差來源依 Biggs 氏[4]分類如下：

1. 絕對校正誤差（Absolute Calibration Error）

   此為利用標準校正裝置進行感測器性能校正時，校正裝置自身產生之誤差。

2. 光譜反應誤差（Spectral Response Error）

   此誤差來自感測器無法感測入射光源所有波長之能量，僅能反應部份光譜波長之能量而導至之誤差值。

3. 位置誤差（Spatial Error）

   因感測器放置角度影響光源入射引起之量測誤差。

4. 線性誤差（Linearity Error）

   輸出訊號與入射能量間偏離線性關係引起之誤差量。

5. 反應時間誤差（Response Time Error）

   在感測期間因短暫時期之急速變化（如雲層突然遮掩）引起之誤差，此誤差通常以連續量測點之平均值加以克服。

6. 持久性誤差：（Long-term Stability Error）

   此因儀器老化現象所引起，可以以定期再校正加以消除。

材料與方法

一、日照計：

此研究所利用之日照計共有四種廠牌，分別描述如下：

(一)Eppley Radiometer型（Model 8—48）

在此研究中利用兩具此型日照計以做爲測定比較之標準值。輸出訊號之校正值由原廠提供（例如1mV＝91.8w/m²）

(二)LI-COR200SB型

其感測原理係利用光二極體型元件，材料爲矽光電池，準確度爲±3%，其輸出比例值已調整爲1mV＝1,000w/m²。

(三)Cds型

此型日照計爲自製設備，共有兩具，其輸出端連接一固定電流，用以相應電阻之變化而量測輸出電壓，輸出範圍可調整爲0—1V或0—5V。

(四)INS型

此爲國內三淵公司開發完成之照度計（註），在此研究中，由該公司協助製作訊號輸出轉換器，提供0—2V之輸出訊號。其感測器之感測元件爲矽光質二極體，置於陶塑材料製成之半球形圓頂白色聚光片，用以消除入射角度誤差並可保護外在環境干擾。

1. DX—100型

此型感測器原用以量測照度，因此其輸出係以液晶顯示窗直接顯示照度值（lux），動力來源爲9V電池，量測範圍爲0～200，000 lux，以三段方式呈現；在此研究中，以三具此型感測器比較性能，並由原廠商增裝感測訊號電壓輸出裝置。

2. DX—200型

此型感測器在液晶顯示窗增加 lux-Fc 單位轉換裝置，並增加裝置電壓（0～2V）訊號輸出裝置，其動力來源爲9V電池。

3. INS-TARI型

爲針對農業感測與控制之需要，此研究委託三淵公司就其原照度量測計修改爲日照能量量測專用之感測器，除保留其原矽質二極體感測元件，其主要之修改如下：

(1)捨棄其原先液晶顯示窗組件，以減低製造成本，並可避免因此組件因暴露於大氣環境下損害而影響量測性能。

(2)以變壓器提供直流電以提供直流電以提供電源，減少電池更換之問題。

(3)以轉換器處理感測訊號，直接以電壓訊號輸出，其電壓訊號介於0—2V之間，以便利與其他介面裝置之連結利用。

經改良後之日照計僅有感測元件與轉換器兩個組件，體積減少，便以裝置於農業設施。

（註）：此研究報告所述及之廠商名稱僅說明此研究使用設備來源，並無忽略其他廠商之意。

二、性能測定方法：

在日照性能比較中，將測定之感測器放置於同一水平面，各種感測器外型如圖1所示。

由於 Eppley Rediometer 與 LI-COR 型日照計其輸出訊號十分微弱，先以100倍之電壓放大訊號後再由記錄器加以記錄。五型日照計所用之記錄器爲 Ling-Shyh 型（Model LS-EIR-48）。

試驗之光源爲自然陽光，每次連續測試3至4天，每10分鐘一次記錄。

圖1　各型日照計之感測元件

Fig. 1 The diagram of the sensing elements for Pyranometers.

A： Eppley Radimeter, B：LI-COR 型，C：CdS 型，D：INS 型.

三、性能測定技術：

感測器之性能主要有四項：準確性、精確性、遲滯性與持久性(1)，因此研究所用之自然光源非固定值，不易在同一標準狀態下重覆量測數據，因此精密性性能不在此研究中實施。其他三項性能的應用統計技術如下：

(一)準確性：

利用標準值（y）與量測值（x）之關係，繪出校正曲線以建立校正方程式，通常之校正曲線有六型(2)，此研究中以 $Y=kx$ 與 $Y=C_1+C_2 \cdot X$ 之公式進行比較，並以標準差（s）爲性能比較標準(1)。

(二)遲滯性：

爲比較感測器之感測訊號是否有遲滯性存在，利用具有分類變數（Indicator Variables）之迴歸技術(8,9)，將校正公式定義爲：

$$y=b0+b1 \cdot I+f(x) \quad \cdots\cdots(1)$$

量測訊號 X 值由低而高時，$I=1$，X值由高而低時，$I=2$。利用迴歸技術可檢定 bi 值否顯著地與零值有差異存在。若 bi 值無存在意義即代表遲滯影響性不大。

(三)持久性：

在建立適用的迴歸模式 f(x)後，各不同測試期間之 N 組數據可加以分析其是否具有顯著差異，其統計技術如同電子相對濕度計持久性比較(2)。此技術也應用於同型式日照計之性能比較。

結果與討論

四型日照計之性能試驗自1991年5月至1991年1月執行，共計8個月共有10組數據（D_1～D_{10}），各組數據量測間隔自2週至1個月，其測定結果討論如下：

一、準確性

(1)LI-COR200SB 型

以典型之 D_5 數據說明此性能，其量測數值（x_1）與標準數值Y（Eppley Radimeter）之分佈爲良好之線性分佈，其校正公式如下：N爲數據數目，S表示標準差。

$Y_1=12.06+0.955 \cdot X_1$，$S=12.8$，$R^2=0.997$ ……(2)

$Y_2=0.975 \cdot X_1$，$S=13.2$ ……(3)

$\Sigma|Y-X_1|/N=22.5$ ……(4)

$\sqrt{\frac{(Y-X_1)^2}{N}}=25.5$ ……(5)

由此可知，以 LI-COR 200SB 感測器直接讀出值與標準值直接比較，其誤差約22W/m²，在日照量600～700W/m²時，其誤差約3%，此與其規格符合。若對輸出訊號進行輸出訊號微調，將輸出訊號以0.975倍率調整，則其準確度爲13.2W/m²（公式(3)），誤差約2%。利用線性公式加以調整輸出訊號對準確性改良不大。

(2)INS照度計

此型照度計之輸出訊號爲電壓值（X_2），與標準值Y亦有良好的線性關係，其典型數據分佈，如圖2a所示。

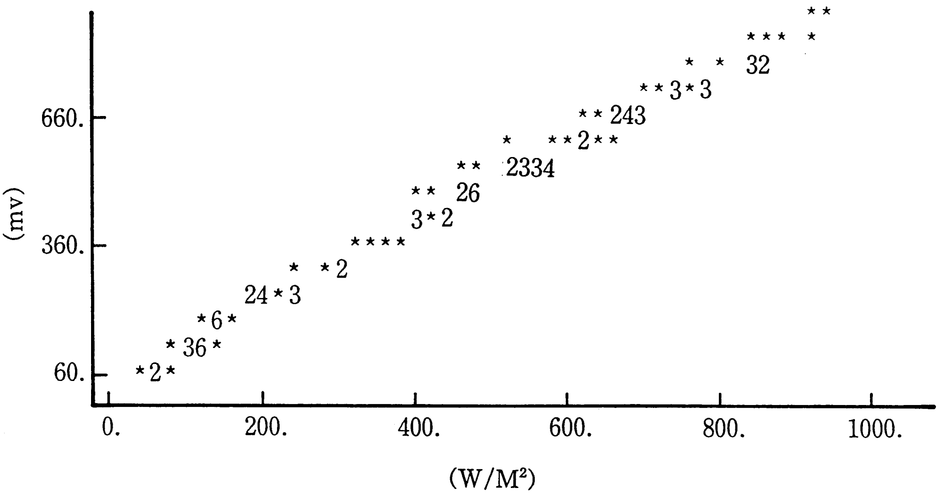

圖2a INS-100型日照計讀出值與標準值之關係

Fig. 2a. Reading values vs. standard values for INS-100 meter (Numbers in the figure indicate the replications)

INS—100典型之校正曲線以 D_6 組數據表示如下：

$Y=4.9+0.9444\ X_2$，$S=12.5$，$R^2=0.996$ ……(6)

或$Y=0.934\ X_3$，$S=13.6$ ……(7)

由此可知此種INS-100日照計輸出之電壓訊號（mv）以0.934倍調整計算爲日照能量（W/m²）後，準確性約14W/m²，利用線性公式調整對準性影響不大。

在 D_1 至 D_{10} 數據中，Dx-100輸出訊號經 Y=k.x方式調整之準確度約爲10～18W/m²。

(3)INS-200型

典型之校正關係以 D_8 組數據加以說明，X_3 爲讀出值（mv）

$Y=16.4+0.881X_3$，$S=16.1$ ……(8)

$Y=0.902X_3$，$S=17.5$ ……(9)

可知此型日照計利用倍率調整亦可達到良好的量測性能，各組之數據顯示其準確性於14W/m²至22W/m²之間，與INS-100型相似。

(4)INS-TARI型

典型的讀出電壓值（mv）與標準值（W/m²）之數據分佈如圖2b。

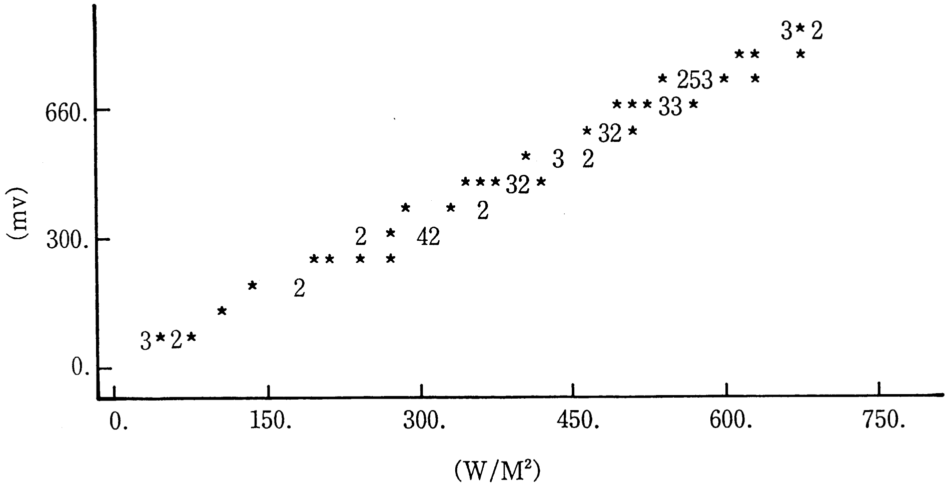

圖2b INS-TARI 型日照計讀出值與標準值之關係

Fig. 2b. Reading values vs. standard values for INS-TARI meter

以 D_{10} 組數據中兩具感測器說明其輸出電壓與日照能量之關係

a.No.1型

$Y_1=23.35+0.945X41$，$S=16.6$ ……(10)

$Y_1=0.991X_{41}$，$S=19.0$ ……(11)

b.No.2型

$Y_2=14.43+0.863X_{42}$，$S=16.5$ ……(12)

$Y1=0.889X_{42}$，$S=17.5$ ……(13)

校正結果其準確性均於15～22W/m²之間。

(5)CdS 感測器

典型 CdS 之輸出電壓與照能量成曲線關係（圖3）。以 D_7 組之數據爲例，其最佳校正模式爲對數關係數，$S=35W/m^2$。

$\ln Y=21.133-2.168\ln X_5$ ……(14)

在十組數據中，其準確性範圍爲30～50W/m²。

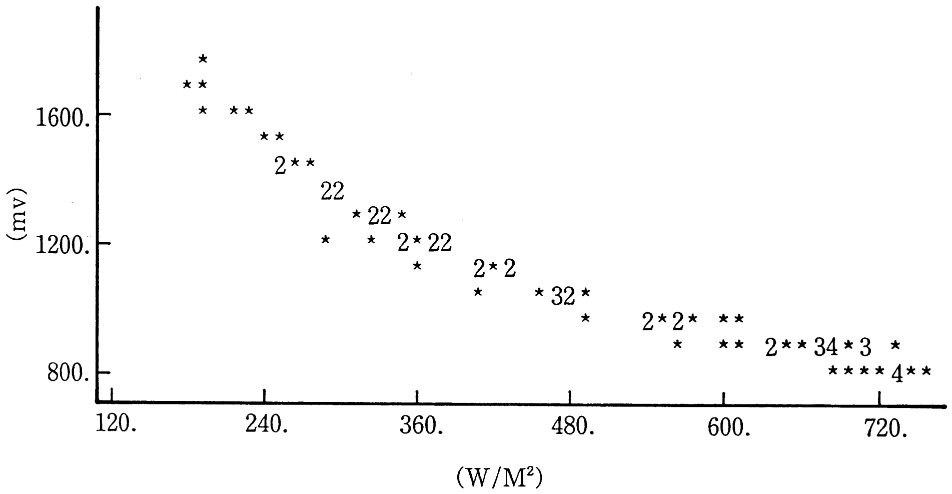

圖3 CdS 型日照計讀出值與標準值之關係
Fig. 3. Reading values vs. standard values for CdS type meter

二、遲滯性

以迴歸分析進行核定結果，各型日照計之準確性受到遲滯性之影響並不顯著。

三、耐久性

在8個月的持久性測定中，LI-COR200SB 型與三種 INS 日照計其各組數據之校正曲線並無顯著的差異，顯示此類感測合乎半年以上持久能力之要求。Cds 型測定器其校正曲線受使用時間有漂移（Shift）現象，漂移誤差值約50～80W/㎡。

四、相同型式感測計之個型差異性：

對相同廠牌之日照計而言，其性能曲線之關係說明如下：

1. Eppley Radimeter

兩具 Eppley 型之日照性性能關係式如下：

$Y_1=19.3+0.9213\cdot Y_2$，$R^2=0.999$，$S=6.55$ ……(15)

雖然兩者有高度之相關性，但其相關直線斜率不等於1.0，常數項更大於0，因此每一日照計必須有其特定之校正係數。

2. INS lux meter

對三具 INS-Dx100與另三具 INS-Dx200之日照計其性能曲線相互比較，其相關性以 R^2 值計算時均高於0.996，但其校正曲線均相互偏離 $Yi=1\cdot Xi+0$之型式，顯示每具日照計都必需有其特定之校正曲線。

以5具改良之 INS-TARI 型之性能校正關係式表示類特性：

a. $Is=0.889\ Xa$，$S=17.0$ ……(16)

b. $Is=0.991\ Xb$，$S=19.2$ ……(17)

c. $Is=0.901\ Xc$，$S=20.0$ ……(18)

d. $Is=1.023\ Xd$，$S=20.6$ ……(19)

e. $Is=0.980\ Xe$，$S=19.0$ ……(20)

Is 爲 Eppley Redimeter 之量測值， Xi 爲各INS-TARI 型日照計之量測值，由5組之數據比數，顯示此型感測器必須有其特定之校正係數。

3. Cds 感測器

同型式之 CdS 感測器其性能曲線有更大的差異，以兩具 CdS meter 之校正曲線公式說明如下：

a. $\ln IS = 20.4 - 2.05\ln \cdot X_{c1}$ ······(21)

b. $\ln IS = 21.68 - 2.222\ln \cdot X_{c2}$ ······(22)

在相同之 Is 條件下，兩具 CdS 感測器之反應值差異爲40～60％，可知同一原理之感測元件，其反應特性具有極大之差異。

五、農業日照能量測評估

在設施生產作業中日照能量之量測目的主要用以爲環境調整之依據，用以提供作物生長良好的光源。適當的日照感測器配合其輸出電壓訊號，在遮蔭作業時連結控制器即可指揮遮蔭裝置，達到作業需求。由於農作物對光照之需求量往往非絕對值，而有一定量的適用範圍，若誤差值小於5,000lux，在作物成長上可以接受(3)。

此研究中 LI-COR SB200 型日照計，其直接量測誤差約爲20W/m²，因1W/m²值相當爲108lux，其準確性爲±2,200lux，已符合作物成長日照控制用之感測要求。輸出訊號經比例調整後可改良爲1,500lux左右。但此型感測器售價均在新台幣數萬元左右，其購置成本偏高。

CdS 感測器其準確度較差（30～50w/m²），且隨使用時間產生顯著之性能漂移現象，使用時其校正作業間隔必需縮短（約兩個月一次），因此並不適用於日照能量之測定工作。

INS 型感測器其感測元件爲二極體，輸出電壓訊號與標準值以校正參數轉換時，其準確性約爲20W/m²，此與 LI-COR SB200型之性能十分相似，亦可合乎 WMO 第一級的性能標準，然而其售價僅需千元台幣，約爲 LI-COR SB200型售價的十分之一。對 INS-TARI 型日照計而言，其結構更爲簡單，可直接連接控制器或 PC 電腦介面，在持久性能亦爲穩定，因此十分適用於國內設施生產作業日照量之量測和控制。

結　　論

綜合上述研究，所得結論如下：

1. 經由適當的校正，利用光二極體爲感測元件之日照計均可合乎世界氣象組織第一級之標準。
2. 利用 CdS 元件開發之日照感測器其反應曲線爲典型之對數曲線，其誤差範圍均爲30～50W/m²，而其性能受到使用時間之顯著影響。
3. 利用國產之照度計改良而成之日照能量量測設備，INS 型日照計，其準確性約爲20W/m²，其持久性十分穩定，而成本十分低廉，因此可適用於本省設施工程日照能量量測與控制作業。

參考文獻

1. 陳加忠，曹之祖，賴建洲，1990，電子相對濕度計之性能評估，農業工程學報　36(4)：79-96。
2. 陳加忠，曹之祖，陳麗娥，1991，稻穀水份計性能之測定與應用限制，中華農業研究　41(4)：445—458。
3. Aldrich, R. A., R. J. Downs, D. T. krizer and L. E. Campbell. 1982. The effect of environment on plant growth. In "Ventilation of agricultural structures", ed. Hellickson, M. L. and J. L. and J. N. Walker, P. 217-254. ASAE.
4. Biggs, Willion. W. 1989. Radiation Measurement Instruments, LI-COR INC, Lincoln, NE, USA.
5. HAENNI, 1988, Measuring Instruments Climate and Solar, HAENNI & CIE. AG. Switzerland.

6. Hanan, J. J. 1984. Plant Environmental Measurement, Bookmakers Guild, Longmont, Colorado.
7. LI-COR, 1986, LI-COR Radiation sensors instruction manual, LI-COR Inc, Lincoln, NE, USA
8. Myers, R. H. 1986. Classical and Modern Regression with Application, PWS and Kent Publ. CO. MA. USA.
9. Weisberg, S. 1984. Applied Linear Regression. Willey & Sons Pub.
10. WMO, 1983, Guide to meteorological instruments and methods of observation. World Meteorological Organization NO.8, 5th edition, Geneva, Switzerland.

Testing and Evaluating of the Performance of Agricultural Pyranometer[1]

C. C. Chen[2]

Summary

The objectives of this research were to develop and test the performance of serveral pyranometers used in agricultural environment. The experimental results indicated that the accuracy of the Silicon Photovotatic cell pyranometers could compare well with the WMO standards for the first class instruments. The Cds-type solar meter has the higher error and serious aging problem. The accuracy of the INS-series meters that developed from the domestic LUX meter was nearly 20w/m². The long-term stability was very well and the cost was inexpensive. It could serve as adequate pyranomenter to measure the solar energy and control the shading device for the protected culture in Taiwan.

Key words : Pyranometer, Calibration curve, Performance of evaluation

---

1. Contribution No. 1623 from Taiwan Agricultural Researech Institute.
2. Associate researcher, TARI, Taichung, Taiwan.